

# 端面反射引起的光纤光栅传感阵列的串扰分析

张自丽 陈小军 叶博 葛辉良

杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310023

**摘要** 对光纤端面反射引起的光纤光栅阵列的信号串扰进行了理论分析和计算,并通过实验测试了端面反射引起的传感阵列阵元的信号串扰值。根据阵列信号串扰产生的机理提出了光纤端面反射的抑制方法,通过实验对该方法进行了验证。对光纤端面反射进行抑制后,实验得到阵列端面反射引起的串扰小于 $-70$  dB,可满足光纤光栅传感阵列的实际使用需求。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅传感阵列; 端面反射抑制; 串扰

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.120604

## Analysis of Crosstalk in Fiber Grating Sensor Array Caused by Fiber-End Reflection

Zhang Zili Chen Xiaojun Ye Bo Ge Huiliang

Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** Signal crosstalk of the fiber grating array induced by fiber-end reflection is calculated and analyzed theoretically. The signal crosstalk value of the sensor array element caused by the end reflection is tested by experiment. According to the mechanism of the signal crosstalk, the suppression method of the fiber-end reflection is proposed, and it is verified by experiment. After suppression of the fiber-end reflection, the crosstalk value is less than  $-70$  dB due to the fiber-end reflection, which can meet the requirement of actual use of the fiber grating sensor array.

**Key words** fiber optics; fiber grating sensor array; fiber-end reflection suppression; crosstalk

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 050.2230

## 1 引言

基于光纤光栅法布里-珀罗(F-P)干涉仪的传感阵列通过利用光栅的反射特性和波长选择性,采用时分复用、波分复用技术,可使单根光纤复用多个传感阵元<sup>[1-3]</sup>。与基于光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪、迈克耳孙干涉仪的传感阵列相比,其不需要采用大量的耦合器、波分复用器、反射镜等分立的光纤无源器件,同时减少了阵列内的熔接点,简化了传感阵列的结构,增强了阵列的可靠性。

对基于时分复用技术的低反射率光纤光栅 F-P 干涉仪传感阵列的研究表明,阵列内的信号串扰现象限制了阵列的复用规模和探测性能<sup>[4]</sup>。串扰主要来自于阵列内光栅间的多次反射。Kersey 等<sup>[5]</sup>通过理论分析计算表明,采用反射率为 0.25% 的光栅构成的 25 元阵列多次反射引起的串扰均值约为  $-35$  dB。采用反射率为 1%~2% 的环形反射镜构成的 4 元 F-P 干涉仪阵列的测试串扰值为  $-26$  dB~ $-35$  dB<sup>[6]</sup>。采用反射率为 8% 的光栅构成的 3 元阵列的测试串扰最大值约  $-16$  dB<sup>[7]</sup>。采用低反射率光栅构成阵列可以减轻多次反射现象引起的串扰,但随着反射率的降低,阵列内的瑞利散射、光纤的端面反射引起的串扰不可忽视。本文分析了光纤端面反射对阵列串扰的影响,通过采用光纤末端光功率衰减、端面反射隔离和端面折射率匹配的方法对光纤端面反射引起的串扰进行了抑制。

收稿日期: 2016-08-08; 收到修改稿日期: 2016-08-27; 网络出版日期: 2016-11-23

作者简介: 张自丽(1979—),女,硕士,高级工程师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: zhangzili2005@aliyun.com

## 2 光纤光栅阵列端面反射引起的串扰分析

图1为基于时分复用技术的光纤光栅 F-P 干涉仪阵列。阵列由相同的  $N$  根光栅组成,其中心反射波长为  $\lambda$ 、反射率为  $\alpha$ 。相邻光栅对与中间的传感光纤组成一个传感阵元,双程时延为  $\tau_d$ 。传感光纤可采用增敏措施提高其对探测信息的敏感性。

阵列输入波长为  $\lambda$ 、脉宽为  $\tau_p$ 、周期为  $T$ 、光强为  $I_0$  的光脉冲,经由光栅反射回  $N$  个光脉冲,反射光脉冲进入两臂不等长、且臂长差时延为  $\tau_d$  的时延补偿干涉仪。时延补偿干涉仪将输入光脉冲分成两束,两束光脉冲时延差为  $\tau_d$ ,相邻光栅对的反射脉冲经时延补偿干涉仪后发生干涉。含  $N$  个光脉冲的脉冲串经时延补偿干涉仪后输出含  $N+1$  个光脉冲的脉冲串,脉冲串内包含  $N-1$  个干涉光脉冲,每个干涉脉冲对应一个传感阵元,干涉光脉冲包含了传感阵元的探测信息。若阵列光纤末端的端面未进行处理,光脉冲由光纤出射至空气中时,在端面处产生菲涅耳反射,端面反射率与低反射率光栅相比不可忽略。对于波长为  $\lambda$  的输入光脉冲,光纤端面可看作是中心反射波长为  $\lambda$ 、反射率为  $\alpha_{\text{end}}$  的光栅。

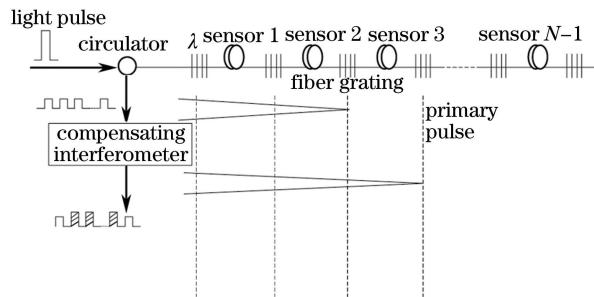


图1 基于时分复用技术的光栅 F-P 干涉仪阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the grating F-P interferometer array based on the time-division multiplexing technology

阵列的第  $i$  根光栅一次反射的光脉冲强度为

$$I_i = I_0 \cdot \beta^{2(i-1)} \cdot \alpha, \quad (1)$$

式中  $\beta$  为光栅的透射率,  $\alpha$  为光栅的反射率,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

光纤端面反射的光脉冲强度为

$$I_{\text{end}} = I_0 \cdot \beta^{2N} \cdot \alpha_{\text{end}}. \quad (2)$$

以图1中的传感阵元3为例,在其他阵元处或光纤端面附近施加信号,可能导致传感阵元3的探测信号中有该信号输出,对于传感阵元3,该信号为串扰信号。若施加的信号幅度为  $V_0$ ,在传感阵元3处探测到该信号的幅度为  $V_1$ 。串扰  $C_t$  可表示为

$$C_t = 20 \lg(V_1/V_0). \quad (3)$$

假定相邻光栅对的一次反射光脉冲偏振态相同,组成传感阵元  $m$  的光栅  $m, m+1$  的反射光脉冲干涉后光强为

$$I_{(m,m+1)} = I_0 \cdot \beta^{2(m-1)} \cdot \alpha + I_0 \cdot \beta^{2m} \cdot \alpha + 2I_0 \cdot \beta^{2m-1} \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_m, \quad (4)$$

式中  $1 \leq m < N$ ,  $\varphi_m$  表示传感阵元  $m$  处的被测信号引起的相位。可以通过对时延补偿干涉仪应用相位生成载波(PGC)技术、外差解调技术获得传感阵元的探测信号  $\varphi_m$  [5,7]。对图1中含2个传感阵元的阵列,  $\alpha = 0.01$ ,光栅间多次反射引起的串扰最大值为  $-40$  dB;4阵元阵列,  $\alpha = 0.01$ ,串扰最大值为  $-30$  dB;8阵元阵列,  $\alpha = 0.0025$ ,串扰最大值为  $-33.8$  dB [7]。降低光栅的反射率和阵列阵元数可以减小光栅多次反射引起的串扰,但阵列内光纤的端面反射、散射引起的串扰不可忽视。

### 2.1 光纤端面反射与第 $N$ 根光栅反射光脉冲叠加引起的信号串扰

假定第  $N$  根光栅与光纤末端之间的光纤引起的双程时延为  $\tau_1$ ,当  $\tau_1 < \tau_p$  时光纤端面反射与第  $N$  根光栅反射光脉冲叠加,经时延补偿干涉仪后与第  $N-1$  根光栅的反射脉冲发生干涉。

由(4)式得到第  $N, N-1$  根光栅反射光脉冲的干涉项光强为  $2I_0 \cdot \beta^{2(N-3)} \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_{N-1}$ 。光纤端面反射与第  $N-1$  根光栅反射的光脉冲干涉后的光强为

$$I_{(N-1,\text{end})} = I_0 \cdot \beta^{2(N-2)} \cdot \alpha + I_0 \cdot \beta^{2N} \cdot \alpha_{\text{end}} + 2I_0 \cdot \beta^{2N-2} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \alpha_{\text{end}}} \cdot \cos(\varphi_{N-1} + \varphi_{\text{end}}), \quad (5)$$

式中  $\varphi_{N-1}$  表示光栅  $N-1$  与光栅  $N$  构成的传感阵元处的探测信号引起的相位差;  $\varphi_{\text{end}}$  表示光栅  $N$  与光纤末端端面之间光纤因该处探测信号引起的相位差, 该信号在阵元  $N-1$  处引起信号串扰。应用 PGC 解调技术、外差解调技术时, 光纤端面反射与第  $N$  根光栅反射光脉冲的干涉项因不包含高频的载波成分, 在信号解调过程中可忽略<sup>[5]</sup>。(5) 式中的干涉光信号经光电转换、信号解调, 得到阵元  $N-1$  处的串扰信号为

$$\beta \cdot \sqrt{\alpha_{\text{end}}/\alpha} \cdot \varphi_{\text{end}}。$$

由(3)式可得光纤端面反射引起的阵元  $N-1$  的串扰大小为  $20\lg(\beta \cdot \sqrt{\alpha_{\text{end}}/\alpha})$ 。当端面反射率不变时, 增加光栅的反射率可以抑制串扰, 但将导致光栅间的多次反射引起的串扰增加。当光栅反射率一定时, 降低端面的反射率或端面输出光功率可以减小串扰。当  $\alpha=0.01, \alpha_{\text{end}}=0.01$  时, 串扰值为 0 dB。若  $\alpha_{\text{end}} < 10^{-6}$  时, 串扰值小于 -40 dB。此外, 还可从时延上分离光纤端面反射与光栅反射光脉冲, 避免两者引起叠加。

## 2.2 因输入光脉冲有限消光比产生的泄漏光经光纤端面反射引起的信号串扰

输入光脉冲一般是由连续光通过声光调制器或电光调制器产生, 具有一定的消光比。光纤光栅的反射率低, 消光比的影响不可以忽略。光脉冲的泄漏光经端面反射后光强为

$$I_0/E_x \cdot \beta^{2N} \cdot \alpha_{\text{end}}, \quad (6)$$

与第  $m$  根光栅一次反射的光脉冲干涉后的光强为

$$I = I_0 \cdot \beta^{2(m-1)} \cdot \alpha + \frac{I_0}{E_x} \cdot \beta^{2N} \cdot \alpha_{\text{end}} + 2I_0 \cdot \beta^{(m+N-1)} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \frac{\alpha_{\text{end}}}{E_x}} \cdot \cos(\varphi_m + \varphi_{m+1} + \dots + \varphi_{N-1} + \varphi_{\text{end}}), \quad (7)$$

式中  $E_x$  为光脉冲的消光比。泄漏光经光纤端面反射后, 多个阵元的探测信号均在被测阵元处引起信号串扰, 由(3)和(7)式得到信号串扰大小为  $20\lg[\beta^{N-m} \cdot \sqrt{\alpha_{\text{end}}/(E_x \cdot \alpha)}]$ 。

图 2 仿真了  $E_x=10^4, N-m=0$ , 端面反射率分别为 0.01, 0.02, 0.04 时, 泄漏光经光纤端面反射引起的信号串扰值与光栅反射率的关系。当  $\alpha=0.01, \alpha_{\text{end}} \leq 0.01$  时, 串扰值小于 -40 dB。为进一步降低串扰, 需要增加光脉冲的消光比、降低端面的反射率。

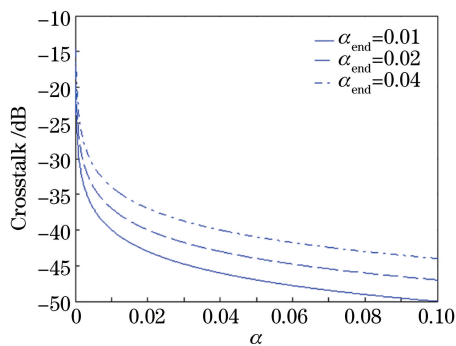


图 2 光脉冲有限消光比导致的光纤端面反射引起的信号串扰值( $E_x=10^4$ )

Fig. 2 Signal crosstalk value caused by the fiber-end reflection when the input light pulse extinction ratio is finite( $E_x=10^4$ )

## 2.3 光纤端面与阵列光栅间的多次反射光脉冲引起的信号串扰

光纤端面与任意光栅构成反射腔, 端面反射光在阵列内发生多次反射后与时延上相同的光栅一次反射光脉冲叠加, 引起阵元间的信号串扰。图 3 中 A 为端面反射光经 1#、3# 光栅反射后形成的 3 次反射光, B 为端面反射光经 1# 光栅、光纤端面反射后形成的 3 次反射光。反射次数越多光强越微弱, 3 次反射光引起的串扰最强。

端面反射光经光栅  $j, k$  两次反射后光强为

$$I_{\text{end}}^{j,k} = I_0 \cdot \beta^{2(N-j+k-1)} \cdot \alpha_{\text{end}} \cdot \alpha^2, \quad (8)$$

式中  $j \leq N, j < k \leq N+1$ 。

阵列输入周期为  $\tau = (N+1)\tau_d$ , 脉宽为  $\tau_d$  的光脉冲,  $\tau_p < \tau_d, \tau_1 < \tau_p$ 。三次反射光 A 与下一个输入光脉冲周期内的 1# 光栅的一次反射光叠加。三次反射光 A 与 1# 光栅和 2# 光栅的一次反射光经时延补偿干

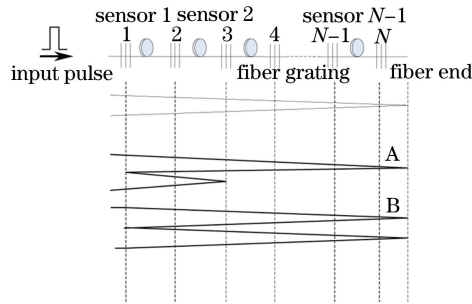


图3 光纤端面与光栅间的三次反射光脉冲光程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three times reflected pulse paths between fiber-end and fiber gratings

涉仪后发生干涉。因反射光 A 经过传感阵元 1~N-1、光栅 N 至光纤末端,所以多个阵元的探测信号均在 1# 传感阵元处引起信号串扰。

假设反射光  $I_{\text{end}}^{j,k}$  与光栅  $m$  的一次反射脉冲干涉,干涉光强为

$$I = I_0 \cdot \beta^{2(m-1)} \cdot \alpha + I_0 \cdot \beta^{2(N-j+k-1)} \cdot \alpha_{\text{end}} \cdot \alpha^2 + 2I_0 \cdot \beta^{(m+N-j+k-2)} \cdot \alpha \sqrt{\alpha \cdot \alpha_{\text{end}}} \cdot \cos(\varphi_m + \varphi_{m+1} + \dots + \varphi_{N-1} + \varphi_{\text{end}} + \varphi_j + \dots + \varphi_{k-1}), \quad (9)$$

由(3)和(9)式得到信号串扰大小为  $20\lg(\beta^{N-j+k-m+1} \cdot \sqrt{\alpha_{\text{end}} \cdot \alpha})$ 。

图4仿真了不同端面反射率下三次反射光脉冲引起的信号串扰与光栅反射率的关系。为了简化计算,令  $N-j+k-m+1=0$ 。随着端面反射率和光栅反射率的增加,串扰值增加。当  $\alpha=0.01, \alpha_{\text{end}} \leq 0.01$  时,串扰值小于  $-40$  dB。当光栅反射率不变时,降低三次反射光脉冲引起的信号串扰需进一步减小端面反射率、端面输出光功率,或者降低阵列复用的阵元数、增加光脉冲的访问周期,使得三次反射光脉冲不与光栅一次反射光脉冲重叠。

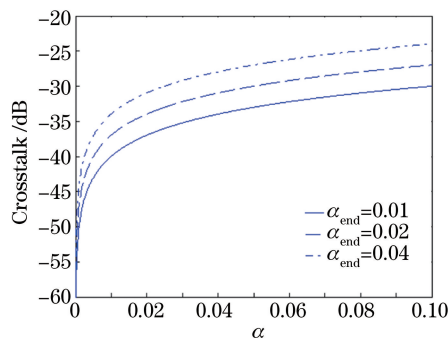


图4 端面反射率为 0.01,0.02,0.04 时,三次反射光脉冲引起的信号串扰与光栅反射率的关系

Fig. 4 Signal crosstalk induced by the three times reflected pulse versus fiber grating reflectivity when the fiber-end reflectivity is 0.01, 0.02, 0.04, respectively

由以上分析可见,端面反射导致的三种串扰的大小与端面反射率成正比。当  $\alpha=0.01$  时,光纤端面反射光与第  $N$  根光栅一次反射光脉冲叠加引起的串扰最强,在  $\alpha_{\text{end}}=0.01$  时串扰为  $0$  dB。当  $E_x=10^4, \alpha_{\text{end}}=0.01$  时,后两种串扰均为  $-40$  dB,大小与 2 元光纤光栅阵列内的光栅间多次反射引起的串扰相当。若光栅的反射率进一步降低,在  $\alpha=0.001, \alpha_{\text{end}}=0.01$  时,三种串扰的大小分别为  $10$  dB,  $-30$  dB,  $-50$  dB。前两种串扰均将超过光纤光栅阵列内的光栅间多次反射引起的串扰。

### 3 实验结果与讨论

采用图5所示光纤光栅阵列测试光纤端面反射引起的阵列串扰。阵列包含3根光栅,光栅反射率为0.01,反射中心波长为1558.17 nm。相邻光栅对构成一个传感阵元。阵元光纤总长为40 m,阵元内的压电陶瓷环(PZT)绕制光纤长度  $L_0$  为4 m,在压电陶瓷环上施加正弦信号模拟外界信号调制。压电陶瓷环PZT1(PZT2)两端至光栅间的光纤长度  $L_1$  和  $L_2$  均为18 m。压电陶瓷环PZT3至光栅3的光纤长度为

0.5 m。阵列输入中心波长为 1558.17 nm、线宽小于 10 kHz、周期为 4  $\mu$ s、脉冲宽度为 150 ns 的光脉冲,其峰值功率为 10 mW。在 4  $\mu$ s 光脉冲周期里,光纤端面与阵列光栅间的三次反射光脉冲不与光栅一次反射脉冲直接叠加,三次以上的反射光脉冲强度越来越微弱,引起的串扰可忽略。端面反射与光栅 1 和光栅 2 的反射光脉冲在时间上分离,与光栅 3 的反射光脉冲叠加,在 PZT3 施加信号时可测试端面反射引起阵元 2 的信号串扰。在 PZT2 和 PZT3 施加信号时,因输入脉冲消光比产生的泄漏光经光纤端面反射引起阵元 1 的信号串扰。

实验阵列返回 3 个光脉冲,经时延补偿干涉仪后形成图 6 所示的 2 个干涉脉冲,分别对应 2 个传感阵元。

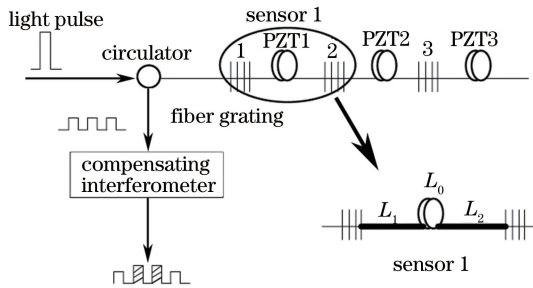


图 5 光纤光栅传感实验阵列

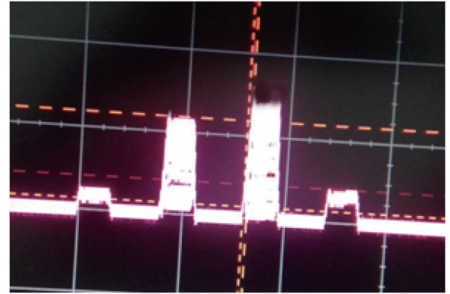


图 6 干涉脉冲图

Fig. 5 Fiber grating sensing experimental array

Fig. 6 Picture of the interference pulses

通过比较阵列光纤端面和光栅反射光脉冲的功率,光纤末端端面反射率为 0.026。PZT3 施加谱级为 -8.6 dB 的 470 Hz 正弦信号,测试传感阵元 2 因端面反射脉冲引起的串扰值。因端面反射光脉冲偏振态随时间变化,多次测量时串扰信号幅度起伏。由图 7 可看出多次测量阵元 2 输出的 470 Hz 信号谱级最大值接近 -4 dB,因此光纤端面未进行处理时串扰最大值为 4.6 dB。理论计算最大串扰值为 4.1 dB,计算值和实测值接近。

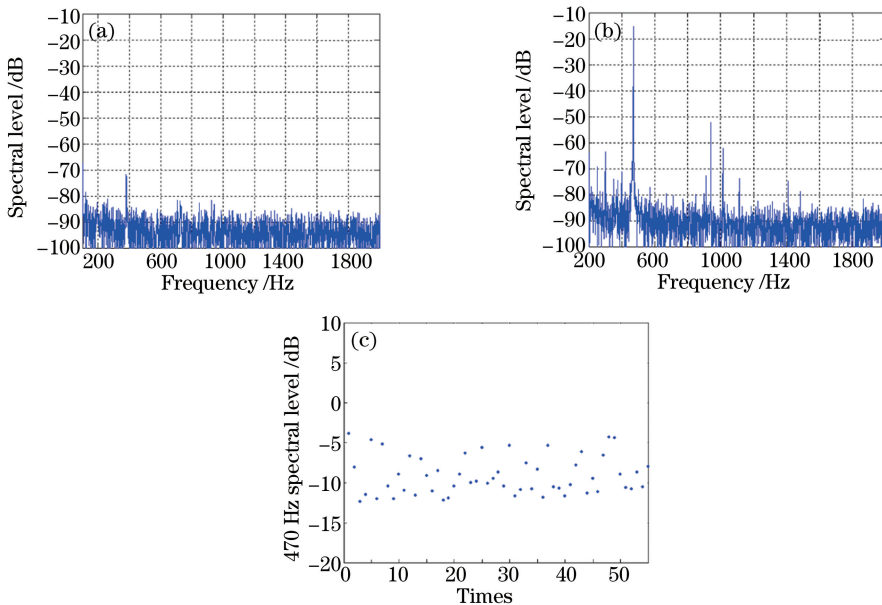


图 7 (a) PZT3 未施加信号时阵元 2 输出信号谱级; (b) PZT3 施加 470 Hz 信号时阵元 2 输出信号谱级; (c) PZT3 施加 470 Hz 信号时阵元 2 输出 470 Hz 信号谱级多次测量值

Fig. 7 Spectral level of the 2<sup>nd</sup> sensor output signal when (a) no signal is applied to PZT3 and (b) 470 Hz signal is applied to PZT3; (c) measured values of the 470 Hz signal spectral level

of the 2<sup>nd</sup> sensor when 470 Hz signal is applied to PZT3

图 8(a)为 PZT3 施加谱级为 -7.8 dB 的 470 Hz 信号时阵元 1 输出的 470 Hz 信号谱级。图 8(b)为 PZT2 施加 470 Hz 信号时阵元 1 输出的 470 Hz 信号谱级。当 PZT2、PZT3 施加信号时,串扰最大值均为 -58 dB。为了抑制串扰,阵列输入的光脉冲消光比大于  $10^5$ ,计算得到最大串扰小于 -46 dB,实测值优于计算值。

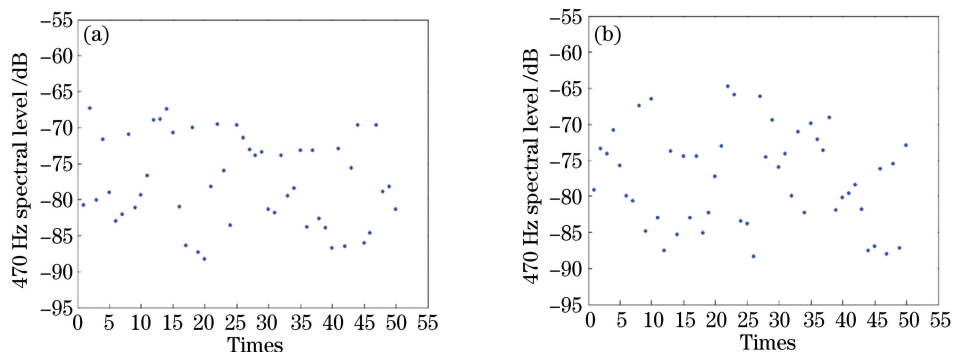


图 8 PZT2、PZT3 施加 470 Hz 信号时,阵元 1 输出信号谱级的多次测量值。(a) PZT3 施加信号;(b) PZT2 施加信号  
Fig. 8 Measured values of the 1<sup>st</sup> sensor output signal spectral level when 470 Hz signal is applied to PZT2, PZT3.

(a) 470 Hz signal is applied to PZT3; (b) 470 Hz signal is applied to PZT2

为了消除端面反射光的影响,对端面反射光进行抑制,如图 9 所示。在 3# 光栅后增加 40 m 时延光纤,从时间上分离光纤端面反射与 3# 光栅的反射光脉冲,避免两者引起叠加。PZT3 后接入光功率衰减器,以减小端面反射光功率的大小。对光纤端面进行折射率匹配处理,减小端面反射率。

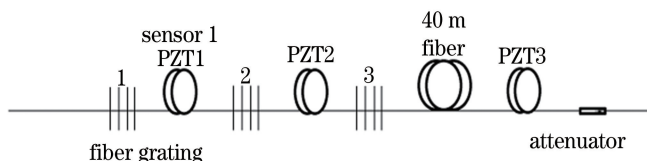


图 9 光纤端面反射抑制

Fig. 9 Fiber-end reflection suppression

对端面反射进行抑制后,对 PZT3 施加 470 Hz 正弦信号,测量阵元 2 因端面反射引起的串扰。如图 10 所示,阵元 2 的 470 Hz 信号谱级最大值约为 -80 dB,串扰最大值为 -71 dB。与图 7 相比,光纤端面反射抑制极大地降低了端面反射引起的信号串扰。图 11 给出了对 PZT2、PZT3 施加 470 Hz 正弦信号时,阵元 1 输出的 470 Hz 信号谱级。测量得到因端面反射引起的串扰值小于 -73 dB,与图 8 相比下降了 15 dB。

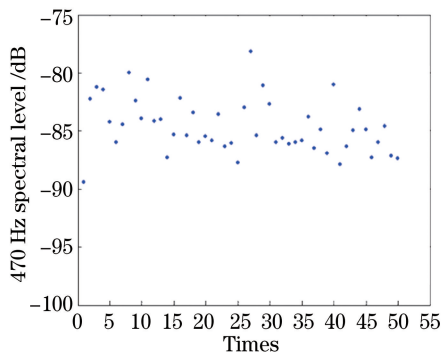


图 10 PZT3 施加 470 Hz 信号时,端面反射抑制后阵元 2 输出 470 Hz 信号谱级得多次测量值

Fig. 10 Measured values of the 470 Hz signal spectral level of the 2<sup>nd</sup> sensor when 470 Hz signal is applied to PZT3 and the fiber-end reflection is suppressed

## 4 结 论

理论分析和实验验证了光纤端面反射引起的光纤光栅传感阵列的串扰。通过在传感阵列光纤末端进行光功率衰减、光纤端面折射率匹配、光纤末端增加时延光纤,可以大幅降低因端面反射引起的信号串扰。实验表明,利用上述端面反射抑制方法,实验阵列因端面反射引起的串扰小于 -70 dB,可满足光纤光栅阵列的实际使用需求。

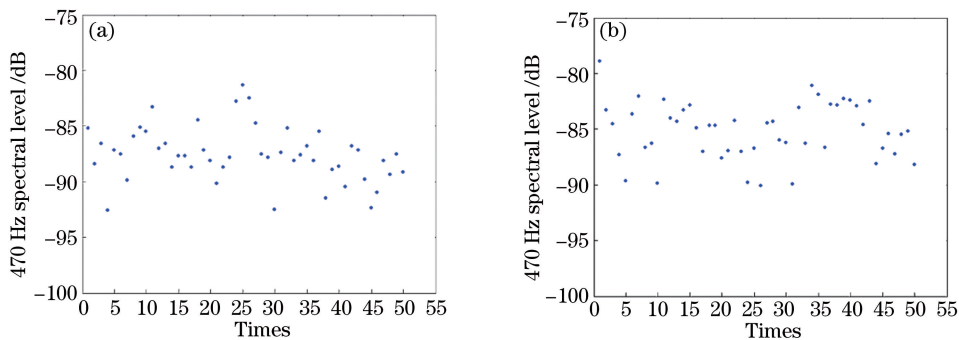


图 11 PZT2、PZT3 施加 470 Hz 信号时,端面反射抑制后阵元 1 输出 470 Hz 信号谱级的多次测量值。

(a) PZT3 施加信号; (b) PZT2 施加信号

Fig. 11 Measured values of the 470 Hz signal spectral level of the 1<sup>st</sup> sensor when fiber-end reflection is suppressed.

(a) 470 Hz signal is applied to PZT3; (b) 470 Hz signal is applied to PZT2

### 参 考 文 献

- 1 Vohra S, Dandridge A, Danver B, *et al.* An hybrid WDM/TDM reflectometric array[C]. Optical Fiber Sensors, 1996, Th3: Th329.
- 2 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- 3 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2196-2201.  
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2196-2201.
- 4 Chan C C, Jin W, Wang D N, *et al.* Intrinsic crosstalk analysis of a serial TDM FGB sensor array by using a tunable laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(1): 2-4.
- 5 Kersey A D, Dandridge A. Analysis of intrinsic crosstalk in tapped-serial and Fabry-Perot interferometric fiber sensor arrays[C]. SPIE, 1989, 985: 113-124.
- 6 Kersey A D, Dorsey K L, Dandridge A. Cross talk in a fiber-optic Fabry-Perot sensor array with ring reflectors[J]. Optics Letters, 1989, 14(1): 93-95.
- 7 Lin H Z, Ma L N, Hu Z L, *et al.* Multiple reflections induced crosstalk in inline TDM fiber Fabry-Perot sensor system utilizing phase generated carrier scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(16): 2951-2958.